



Ueber Gestalt und Spektrum der Atome.¹⁾

Von Ferdinand Lindemann in München.

Als die würdigste Feier akademischer Gedenktage gilt es allgemein, wenn der Redner bei dem festlichen Anlasse über ein Gebiet seines Faches im Zusammenhange berichtet. Für den Mathematiker ist diese Aufgabe schwierig; gestatten Sie ihm deshalb, wenigstens die reine Mathematik bei Seite zu lassen und hier ein Gebiet aus den Anwendungen seiner Wissenschaft zu besprechen.

Die Chemie lehrt uns, daß alle irdischen Stoffe sich aus einigen siebenzig sogenannten Elementen zusammensetzen lassen; auf die genaue Zahl kommt es hier nicht an, sie wird sich wahrscheinlich bei weiterer Verfeinerung der Beobachtungsmethoden noch weiter vergrößern. Aber die Tatsache fesselt unsere Aufmerksamkeit, daß die scheinbar unendliche Mannigfaltigkeit aller körperlichen Erscheinungen, seien sie organischer oder anorganischer Natur, aus einer so kleinen, vor allem aus einer endlichen Anzahl verschiedener Stoffe sich aufbauen läßt.

Worin besteht der Unterschied dieser Stoffe? Der Chemiker gibt uns Kennzeichen für die Unterscheidung durch seine Analyse, die Farbe der Niederschläge bei gewissen Reaktionen, die Kristallform dieser Niederschläge u. s. f.; dadurch sind indessen immer nur charakteristische Erkennungsmerkmale bezeichnet; die Frage nach der innern Natur der verschiedenen Elemente bleibt unbeantwortet. Wir müssen vielleicht zweifeln, ob diese Frage überhaupt zu beantworten ist. Im Gegensatz zur Philosophie genügt es der Naturwissenschaft zu zeigen, daß die Unterschiede vorhanden sind, und daß man Mittel hat, sie streng zu klassifizieren. Darauf beschränkt sie sich gern; und wenn sie auch weiter gehen wollte, so würde die Linie, über welche hinaus uns die Antwort versagt bleibt, vielleicht verschoben, niemals wird sie ausgelöscht werden. Immerhin dürfte es lohnend sein, dies wenigstens zu versuchen: vielleicht gelingt es, die Frage nach den qualitativen Unterschieden der Materie quantitativ zu formulieren, z. B. auf eine rein geometrische Frage der Form zurückzuführen; ist doch in der analytischen Geometrie auch jedes Problem der Form leicht quantitativ auszudrücken. Dann hätten wir die gestellte Frage mathematisch präziser gefaßt und damit wenigstens vereinfacht.

¹⁾ Rede, gehalten am 26. Juni 1905 bei Gelegenheit des Stiftungsfestes der Ludwig-Maximilians-Universität in München vom derzeitigen Rektor.

Vorstellungen über die tatsächliche Einheit aller Materie sind von jeher allgemein verbreitet gewesen; die Mechanik und die Astronomie arbeiten stets mit den Begriffen von Gewicht und Masse, bei denen kein Unterschied zwischen den verschiedenartigen Elementen der Chemie gemacht wird, bei denen aber implicite schon die Idee von der Einheit der Materie zu Grunde liegt, indem eine aller Materie gemeinsame Eigenschaft postuliert wird.

Die Atome der Chemiker sind die kleinsten Teile der Materie, die selbständig für sich bestehen oder mit andern Atomen in Verbindungen eintreten können. Das hindert nicht, daß sie selbst sich aus noch kleineren Teilchen zusammensetzen, deren Isolierung uns nur nicht gelingt. In der That hat man ja in allerneuester Zeit geglaubt, auch hier einen Schritt vorwärts tun zu können, indem man sich vorstellt, daß unter Wirkung von elektrischen Kräften in den sogenannten Geißler'schen oder Crookes'schen bezw. Sittorf'schen Röhren ein Zerspalten der Atome tatsächlich eintritt, daß die sogenannten Kathodenstrahlen eben nichts anders sind, als die Bahnen der zerstäubten Moleküle; und die Versuche mit dem rätselhaften Radium scheinen sogar dahin geführt zu haben, solche Uratome so umzulagern, daß sich aus einem Elemente ein anderes, aus dem Radium das Helium bildet. Wie es sich auch mit diesen noch unsicheren Versuchen verhalten mag, so viel steht fest, daß diese neuesten physikalischen Spekulationen dazu beigetragen haben, die Ueberzeugung von der Wesenseinheit aller Materie neu zu beleben und allgemeiner zu verbreiten.

Wenn der Mathematiker mit den ihm eigentümlichen Hilfsmitteln die aufgeworfene Frage behandeln will, so muß er zunächst aus der Mannigfaltigkeit der chemischen Merkmale ein solches herausgreifen, das der quantitativen Darstellung zugänglich ist, und das sich wirklich nur auf das Atom (nicht, wie z. B. Kristallform, auf Atomgruppen) bezieht. Jedem Elemente kommt ein ganz bestimmtes, aus einer gewissen Zahl von wohl definierten Linien bestehendes Spektrum zu, an welchem das Element umgekehrt sicher erkannt wird; d. h. im gasförmigen und glühenden Zustande (wo die Atome sich einzeln frei bewegen) sendet jedes Element (also jedes einzelne Atom dieses Elementes) Licht aus, das durch den Spektralapparat betrachtet, nicht ein kontinuierliches, in verschiedenen Farben gefärbtes Bild liefert, wie z. B. das Sonnenlicht, sondern eine Anzahl diskreter Linien, deren Lage mit außerordentlicher Genauigkeit festgestellt werden kann, und deren jede einer ganz bestimmten Wellenlänge der zugehörigen, die Farbe exakt definierenden Lichtschwingung entspricht. Diese Wellenlängen sind Zahlen, also quantitative Größen, durch welche alle qualitativen Eigenschaften des betreffenden Elements völlig bestimmt sein müssen.

Von diesen Zahlen wird der Mathematiker ausgehen. Er hat dann folgendes Problem vor sich: Im sonst leeren Raume, der nur mit Lichtäther erfüllt ist, schwebt ein materielles Teilchen, von dem eine Reihe von Schwingungen, jede mit genau definierter Wellenlänge, ausgehen, die sich nach allen Richtungen verbreiten und als Licht bestimmter Farben gesehen werden; welche Eigenschaften muß das Teilchen haben, um nur Lichtschwingungen mit diesen bestimmten Wellenlängen oder Gruppen von Wellenlängen und keine anderen zu erzeugen? Für die mathematische Behandlung

können als solche Eigenschaften nur die Form des Teilchens und die Verteilung der Materie in seinem Innern, d. h. die Dichte und Elastizität dieser Materie in Betracht kommen, aber für solche Behandlung muß die Fragestellung zunächst umgekehrt werden: Gegeben ist ein materielles Teilchen von bestimmter Gestalt, Dichte und Elastizität, das frei im Lichtäther schwebt; welcher Art sind die von ihm ausgehenden Lichtschwingungen, d. h. welche Wellenlängen haben seine sogenannten „Eigenschwingungen“?

So gestellt, hat man es mit einem wohl definierten mathematischen Probleme aus der Theorie der partiellen Differentialgleichungen zu tun: Die Materie im Innern des Teilchens wird in Schwingungen versetzt (z. B. durch Zusammenstöße mit anderen Teilchen); diese Schwingungen setzen sich in den umgebenden Lichtäther durch die Oberfläche des Teilchens hindurch fort, ohne daß an dieser Oberfläche irgendwie eine Unterbrechung der Stetigkeit stattfindet; dadurch ist eine endliche oder unendlich große Anzahl von möglichen Wellenlängen mathematisch bestimmt, die auf ebensoviele diskrete und völlig bestimmte Linien im Spektrum führen.

Man hat nun Dichte, Elastizität, Gestalt und Größe zu variieren und zu sehen, ob man dadurch zu den experimentell festgestellten Verteilungsgesetzen der Spektrallinien gewisser Elemente kommt. Das mathematische Problem ist leider so kompliziert, daß es nur für eine beschränkte Anzahl von Fällen genauerer Behandlung zugänglich ist, und auch hier werden die Gleichungen so außerordentlich verwickelt, daß man sich meist begnügen muß, die gefundenen mathematischen Lösungen so weit zu diskutieren, daß der allgemeine Typus für die Gesetze der Linienverteilung ersichtlich wird; sind doch auch umgekehrt manche Elemente schon durch diesen Typus vollständig genügend charakterisiert.

Der einfachste mögliche Fall ist der folgende: Das betrachtete Atom hat die Gestalt einer Kugel und ist mit Materie gewisser Dichte und Elastizität gleichmäßig erfüllt; welche Lichtwellen sendet diese Kugel aus? Hier läßt sich die Rechnung ziemlich weit durchführen; die gefundenen Spektrallinien sind indessen nach so einfachem Gesetze im Spektrum verteilt, wie es bis jetzt bei keinem Elemente experimentell gefunden ist. Obgleich es also in vielen Problemen der mathematischen Physik genügt, sich die Atome kugelförmig vorzustellen (insbesondere z. B. bei den meisten Problemen in der kinetischen Gastheorie), kommt doch eine genau kugelförmige Gestalt der Atome wohl kaum vor.

Dennoch geben uns die für die Kugel gültigen Formeln ein praktisch verwertbares Resultat an die Hand. Hat man nämlich zwei Kugeln, die aus Materie gleicher Dichte und Elastizität bestehen, sich aber durch ihre Größe unterscheiden, so ergibt sich das folgende Gesetz: Sind die Spektrallinien des von der einen Kugel ausgesandten Lichtes bekannt, so findet man diejenigen der andern Kugel, indem man die Wellenlänge jeder bekannten Linie mit dem Verhältnisse der Radien beider Kugeln multipliziert. Sind die Kugeln nun von gleicher Dichte, so ist dieses Verhältnis der Radien gleich der Kubikwurzel aus dem Verhältnisse der Gewichte der Kugeln, d. h. der Atomgewichte derjenigen Elemente, deren Atome durch die beiden Kugeln dargestellt sein sollen. In dieser Form erlangt das Ge-

ses dann aber ganz allgemeine Gültigkeit: Haben zwei Atome gleiche Form, gleiche Dichte und Elastizität, sind sie also einander ähnlich und unterscheiden sie sich nur durch die Größe, so verhalten sich die Wellenlängen der Spektrallinien dieser Atome, wie die Kubikwurzeln aus ihren chemischen Atomgewichten, und hiernach können die Linien des einen Elementes aus denen des andern berechnet werden.

Dies Gesetz läßt sich leicht an der Hand der Erfahrung einer Prüfung unterwerfen; man braucht zu dem Zwecke nur die zur Verfügung stehenden sorgfältig gearbeiteten Tabellen der Spektrallinien verschiedener Elemente zu vergleichen. Dabei ergibt sich das Resultat, daß die Spektren der folgenden Gruppen von Metallen diesem Gesetze teils gut teils näherungsweise je unter sich genügen:

- 1) Zink, Cadmium und Quecksilber.
- 2) Magnesium, Calcium, Baryum und Strontium.
- 3) Silber, Kupfer und Gold.

Das sind Gruppen von Elementen, die auch sonst wegen ihrer chemischen Eigenschaften zusammengehören. Von den Atomen der Elemente jeder Gruppe können wir hiernach aussagen, daß sie einander ähnlich sind. Umgekehrt aber läßt Ähnlichkeit im chemischen Verhalten durchaus nicht auf Ähnlichkeit der Atom-Form schließen. Beweis dafür sind die Alkalien (Lithium, Natrium, Kalium, Caesium, Rubidium). Die Spektrallinien dieser zusammengehörigen Elemente fügen sich dem erwähnten Gesetze durchaus nicht. Wodurch wird nun hier der Unterschied bedingt, wodurch der Unterschied zwischen den erwähnten drei Gruppen? Entweder sind die Atome aus verschiedenartiger Materie aufgebaut, oder ihre Formen sind einander nicht ähnlich.

Wir bleiben bei der Annahme gleichartiger Materie und variieren die Gestalt. Statt der Kugel wählen wir zuerst ein gestrecktes (also ungefähr eiförmiges) Rotationsellipsoid, wie es geometrisch entsteht, wenn eine Ellipse um ihre große Achse rotiert. Hier ergibt die mathematische Theorie, daß die Spektrallinien eines solchen leuchtenden Ellipsoids von drei Zahlen abhängen, sich also nach drei verschiedenen Prinzipien in Gruppen anordnen lassen. Diese Zahlen ergeben sich als die Wurzeln gewisser transzendenter Gleichungen und lassen sich demnach aus den Achsenlängen des Ellipsoids, aus dessen Dichte und Elastizität berechnen, eine Rechnung, deren wirkliche Ausführung allerdings kaum durchführbar erscheint.

Die erste dieser drei Zahlen bestimmt uns eine Gruppe von zusammengehörigen Linien, eine sogenannte Serie; den verschiedenen möglichen Werten der ersten Zahl entspricht eine gewisse Reihe solcher Serien. Die zweite Zahl bestimmt in jeder Serie eine Untergruppe von Linien, und die dritte endlich legt in jeder Untergruppe eine einzelne, individualisierte Linie fest. Die Art wie diese dritte Zahl in die Rechnung eingeht, lehrt uns ferner, daß die reziproken Werte der Wellenlängen für einzelne Linien der erwähnten Untergruppe untereinander konstante Differenzen bilden, d. h. Differenzen, die nur von der Natur des gegebenen Ellipsoids abhängen. Hierdurch ist ein charakteristischer Typus der Linienverteilung gegeben, ein Typus, der uns aus den Katalogen der Spektrallinien wohl bekannt ist, und sich nur

bei den erwähnten Alkalien findet. Für diese haben Rydberg, Kayser und Runge aus den Beobachtungen gewisse Gesetzmäßigkeiten abgeleitet, welche sich mit den für das Spektrum eines gestreckten Rotationsellipsoids soeben geschilderten im wesentlichen decken, indem die aus der Erfahrung gewonnenen Formeln mit den aus der mathematischen Theorie gewonnenen dem Typus nach übereinstimmen. Die letzteren ergeben sich aus der Darstellung der Integrale linearer Differentialgleichungen mittels semikonvergenter Reihen. Eine wirkliche Durchrechnung in alle Einzelheiten ist bei der Kompliziertheit der Formeln allerdings bisher nicht möglich. Die Atome der Alkalien (Li, Na, K, Cs, Rh,) haben also, so können wir umgekehrt schließen, die Gestalt von verlängerten Rotationsellipsoiden; für jedes einzelne Element sind die Achsenlängen dieser Ellipsoide völlig bestimmt; für verschiedene dieser Elemente sind die betreffenden Ellipsoide einander nicht ähnlich¹⁾.

Zu einer wesentlich anderen Liniengruppierung führt das sogenannte abgeplattete Rotationsellipsoid oder Sphäroid. Es treten hier ebenso viele Gruppen, Serien und Untergruppen auf; aber jenes Gesetz der konstanten Differenzen hat nicht so allgemeine Gültigkeit; die Wurzeln der aufzustellenden transzendenten Gleichungen werden teilweise imaginär; infolge dessen bestehen einzelne Gruppen nur aus einer einzigen starken Linie, andere aus einer beschränkten Zahl. Je stärker die Abplattung ist, desto reiner tritt dieser Typus hervor. Aus der Erfahrung ist letzterer bekannt durch die Gruppierung der Linien im Spektrum der Metalle: Gold, Silber, Kupfer. Auch der Wasserstoff, der in seinem Verhalten so manche Analogie zu den Metallen zeigt, gehört hierher, insofern ein dünnes rundes Plättchen, aufgefaßt als äußerst stark abgeplattetes Ellipsoid, ein Spektrum vom Typus des Wasserstoffspektrums liefert.

Drittens betrachten wir das allgemeine dreiachsiges Ellipsoid, d. h. wir suchen die Wellenlängen des von einem solchen Ellipsoide in glühendem Zustande ausgestrahlten Lichtes. Die entsprechenden Linien des Spektrums hängen hier ebenfalls von drei Zahlen ab, die durch transcendente Gleichungen bestimmt werden, und deren jede eine gewisse Reihe von diskreten Werten durchlaufen kann. Diese Linien lassen sich aber nicht wie in den beiden anderen Fällen in Serien und Gruppen ordnen, da sie sich über das ganze Spektrum verteilen; nur wenn die Gestalt des Ellipsoids dem eines Rotationsellipsoids sehr nahe kommt, wird man einige Serien zusammenstellen können. Das trifft nun bei dem Spektrum der alkalischen Erden (Baryum, Strontium, Calcium und Magnesium) in der That erfahrungsmäßig zu, also bei den Elementen, die auch in ihren chemischen Eigenschaften zwischen den Alkalien und den eigentlichen Metallen stehen. Ähnliches gilt für Zink, Cadmium und Quecksilber. Jene stehen dem gestreckten, diese dem abgeplatteten Ellipsoide näher.

¹⁾ Die mathematische Ableitung der hier und im folgenden erwähnten Resultate findet sich in zwei Aufsätzen, die ich in den Sitzungsberichten der k. bayer. Akademie der Wissenschaften, math. naturw. Klasse, Bd. 31 und 33 (1901 und 1903) veröffentlicht habe. Die Ableitung der genaueren Formeln mittels der semikonvergenter Reihen, sowie die Behandlung der Schwingungen von Ringen und Wulsten wird man in einer demnächst erscheinenden Fortsetzung jener Aufsätze finden.

Gehen wir von einem Rotationsellipsoide aus und denken uns dasselbe allmählich so deformiert, daß es sich in ein allgemeines Ellipsoid verwandelt, so werden sich mit der Gestalt des Atoms auch seine Spektrallinien stetig verändern, und zwar ergibt die mathematische Behandlung, daß dabei aus jeder einzelnen Linie acht neue hervorgehen. Ein solches Aufspalten einer Linie kann man andererseits experimentell hervorbringen, indem man die leuchtenden Atome des betreffenden Elementes zwischen die Pole eines starken Magneten bringt; es ist die bekannte Zeeman'sche Erscheinung. Zwischen den Magnetpolen befindet sich der Lichtäther im Zustande der Polarisierung, d. h. im Zustande einseitiger Spannung; die mathematische Behandlung der Lichtschwingungen im so polarisierten Aether ist aber für ein Rotationsellipsoid genau dieselbe, wie die Behandlung der Schwingungen eines allgemeinen Ellipsoids im nicht polarisierten Lichtäther. Wir können also umgekehrt sagen: Der sogenannte Zeeman-Effekt, d. i. die Spaltung der Spektrallinien durch den Magneten, ist eine Folge der Polarisierung des Aethers und findet so statt, als wenn das Atom durch Druck entsprechend deformiert würde.

Endlich legen wir einen Ring als mögliche Gestalt eines Atoms der mathematischen Analyse zugrunde, d. h. den Körper, welcher entsteht, wenn ein Kreis um eine nicht durch seinen Mittelpunkt gehende Achse rotiert. Wir haben zwei Fälle zu unterscheiden:

- 1) Die Achse schneidet den rotierenden Kreis nicht; der Ring ist in der Mitte offen, er hat die Gestalt eines runden, zusammengebogenen Drahtes oder Stabes, oder kurz eines Fingerringes.
- 2) Die Achse schneidet den rotierenden Kreis; der Ring ist in der Mitte geschlossen; wir sprechen dann von einem Wulste; die Gestalt ist etwa derjenigen einer Orange oder eines Apfels ähnlich.

Auch beim Ringe läßt sich das Schwingungsproblem noch behandeln, wenngleich sich die Schwierigkeiten häufen; damit ist aber die Zahl der bisher in dieser Beziehung mathematisch erledigten Körper abgeschlossen.

Die Spektrallinien eines leuchtenden Ringes findet man abhängig von vier Zahlen, deren jede eine Reihe von Werten durchlaufen muß, und zwar kann man den Typus des Spektrums am einfachsten dadurch sich klar machen, daß man das Spektrum eines verlängerten Rotationsellipsoids mehrmals nebeneinander stellt, dabei natürlich jedesmal die gegenseitige Lage der Linien im Hilfsppektrum etwas verschiebend.

Stellt man in ähnlicher Weise das Spektrum eines abgeplatteten Rotationsellipsoids wiederholt nebeneinander, so entsteht ein solches System von Spektrallinien, wie es einem leuchtenden Wulste der oben bezeichneten Art zukommt.

Genau in dieser Weise beschreiben nun Paschen und Runge die Gruppierung der Spektrallinien im Spektrum des Sauerstoffs und Heliums einerseits, des Schwefels und Selenes andererseits, denn das Sauerstoff-Spektrum entsteht nach ihnen, indem man dasjenige eines Alkalimetalls mehrmals gegeneinander verschiebt, das Schwefelspektrum, indem man im Sauerstoff-Spektrum gewisse Gruppen von Linien durch einzelne starke Linien ersetzt.

So kommen wir zu dem Schlusse, daß dem Sauerstoffatome wahrscheinlich die Gestalt eines Rings, dem Schwefelatome diejenige eines Wulstes zukommt.

Es hat einen großen Reiz den Folgerungen nachzugehen, die sich an diese Vorstellungen und Resultate anknüpfen lassen. Vor allem erscheint auch die chemische Verwandtschaft der Elemente als abhängig von der Gestalt ihrer Atome. Neben anziehenden und abstoßenden Kräften muß die geometrische Form der Atome für Möglichkeit und Stabilität einer Verbindung bestimmend sein. So werden z. B. die Dryde der Metalle entstehen, indem sich ellipsoidische Metallatome in die Oeffnung des Sauerstoffringes legen und diese verschließen.

Das Wasser-Molekül besteht aus einem Atom Sauerstoff und zwei Atomen Wasserstoff; letztere kennen wir bereits als dünne runde Blättchen. Von oben und unten wird sich also je ein solches dünnes Blättchen auf die Oeffnung des horizontal liegenden Ringes legen, und so wird ein Wasser-Molekül entstehen. Analog ist der Aufbau eines Schwefelwasserstoff-Moleküls, denn der Wulst eines Schwefelatoms zeigt oben und unten je eine Vertiefung, an die sich ebenfalls je ein Wasserstoffatom anlegen kann.

Hier darf das Wasserstoff-Atom überall durch ein ellipsoidisches Metall oder Alkali-Atom ersetzt werden, wodurch Hydroxyde und Dryde bez. Schwefelmetalle entstehen. Unter Umständen bilden sich höhere Drydationsstufen, indem sich auf die beiden Metallatome wieder Sauerstoffatome aufsetzen, welche dann ihrerseits freie Höhlungen zum Anschlusse weiterer Metallatome darbieten.

Bei dieser Vorstellung hängt die sogenannte Wertigkeit der Atome von ihrer Gestalt ab; unterscheiden muß man die Wertigkeit in Bezug auf Wasserstoff (allgemeiner in Bezug auf Ellipsoide) und die Wertigkeit in Bezug auf Sauerstoff (allgemeiner in Bezug auf Ringe). Die erstere ist gleich der Zahl der Höhlungen des Atoms, an die sich ein ellipsoidisches Atom anlegen kann, letztere gleich der Zahl der Vorsprünge oder Wölbungen, auf die sich ein Ring aufsetzen kann.

Von besonderem Interesse würde es sein, unter diesem Gesichtspunkte die Chemie der Kohlenstoff-Verbindungen zu studieren. Da erhebt sich vor allem die Frage nach der Gestalt des Kohlenstoffatoms; das Spektrum desselben ist in seiner ganzen Ausdehnung fast gleichmäßig von Spektrallinien durchzogen; es fehlt somit die Möglichkeit empirisch irgend welche Gesetzmäßigkeiten festzustellen; die mathematische Behandlung kann also keine Dienste leisten. Man muß hier die Frage umkehren und versuchen, aus der chemischen Natur der Verbindungen des Kohlenstoffs mit anderen Elementen auf die Gestalt des Kohlenstoff-Atoms zu schließen. Das ist ein Weg, den man in Bezug auf den Kohlenstoff in der That nach dem Vorgange von Le Bel, van't Hoff und Werner betreten hat, obgleich man bei anderen Elementen (abgesehen vom Stickstoff) die Frage nach der Gestalt der Atome bisher bei Seite ließ; dadurch gelingt es der organischen Chemie, Ordnung und Uebersicht in der unendlichen Mannigfaltigkeit von Kohlenstoff-Verbindungen wesentlich zu erleichtern. Verschiedene Vorschläge sind gemacht worden, um die Gestalt des Kohlenstoffatoms so zu bestimmen, daß sich aus ihm insbesondere eine Erklärung der sogenannten isomeren Verbindungen

ableiten läßt. Ob diese Vorschläge mit den hier entwickelten Anschauungen über die Wertigkeit verträglich sind, ob sie nicht vielmehr modifiziert bez. ergänzt werden müßten, kann hier nicht erörtert werden. Die Frage wird dadurch schwierig, daß die moderne Stereochemie, welche es sich zur Aufgabe macht, den Aufbau eines Moleküls aus seinen Atomen im Raume zu veranschaulichen, sich zunächst damit begnügt, ganze Gruppen von zusammengehörigen Atomen wieder als neue Einheiten zu behandeln. Wenn es aber wirklich gelingen soll, die Atom-Gestalt des Kohlenstoff-Atoms nicht nur als Symbol für die systematische Ordnung von Beobachtungen zu benutzen, sondern die Moleküle der organischen Chemie in ihrem räumlichen Bau aus der Gestalt aller benutzten Atome heraus wirklich aufzubauen, dann ist es notwendig, eine jede Atomgruppe, welche im Moleküle einen gewissen engeren Verband bildet, selbst wieder in ihre Atome aufzulösen. Dadurch wird das Problem außerordentlich verwickelt, und wir müssen uns zunächst begnügen, dasselbe hier zu bezeichnen.

Bei solchem Aufbau der Moleküle wird jedem Atome ein wohl definierter Platz im Moleküle angewiesen; vielleicht bleibt ihm so viel Freiheit, daß es an diesem Platze um eine gewisse Gleichgewichtslage Schwingungen ausführen kann. Ganz absehen müssen wir aber von der vielfach verbreiteten Vorstellung, daß die einzelnen Atome im Moleküle um gewisse Zentren geschlossene Bahnen beschreiben, wonach dann jedes Molekül gleichsam ein verkleinertes Planetensystem darstellt. Diese Vorstellung hat man ausgebildet, um sich über die sicher vorhandene „innere Energie“ der Moleküle auf Grund mechanischer Begriffe Rechenschaft zu geben. Diese innere Energie besteht nach den hier vorgetragenen Gedanken in den inneren Schwingungen der Atome, die nur zum Teil als Lichtstrahlen nach außen zur Geltung kommen, während andere sich als elektrische oder magnetische Strahlungen geltend machen werden, und zwar abstoßend oder anziehend, so daß sie von wesentlichem Einflusse auf alle Wechselwirkungen der Atome sind. Insofern es sich hierbei um die sogenannten Eigenschwingungen handelt, d. h. um solche, welche sich ohne irgendwelche Anstetigkeit aus dem Innern des Atoms nach außen in den Lichtäther fortpflanzen, lehrt uns die mathematische Behandlung, daß sie sich immer nur gleichzeitig von innen nach außen und von außen nach innen ausbreiten können, daß also die verlorene innere Energie immer von außen her wieder ersetzt wird, indem der Lichtäther diese Energie von selbst wieder zurückgibt. Während dieser Austausch von Schwingungen bei den meisten Atomen unter gewöhnlichen Umständen nicht merklich ist und erst durch von außen zugeführte Wärme oder durch elektrische Energie angeregt werden muß, scheint bei anderen Elementen (wie Radium, Thorium etc.) dieser Austausch schon unter gewöhnlichen Umständen besonders lebhaft vor sich zu gehen.

In anderer Weise sucht sich die sogenannte Elektronentheorie von der inneren Energie der Moleküle Rechenschaft zu geben. Sie nimmt an, daß mit jedem körperlichen Atome eine große Anzahl von „Elektronen“ verbunden ist, die sich um dasselbe bewegen; diese Elektronen selbst sind weder Materie noch Lichtäther, sondern ein drittes Etwas: Elektrizität. Diese Vorstellung ist im Anschlusse an die Gesetze der Ionen-Wanderung bei der

Elektrolyse entstanden und stützt sich ganz besonders auf die merkwürdigen Strahlungs-Erscheinungen im Innern einer Geisler'schen Röhre, insbesondere auf die Beobachtungen an den Kathodenstrahlen. Oft werden auch die Elektronen direkt als die „Uratome“ angesehen, aus denen die eigentliche Materie besteht; die elektrischen Kräfte zerstäuben die materiellen Atome in diese Uratome, deren Bahnen dann die Kathodenstrahlen sind. Die Spektrallinien sollen dabei durch periodische Schwingungen der Uratome um gewisse Gleichgewichtslagen erzeugt werden, während nach anderen jedem Elektron eine bestimmte Eigenbewegung und somit eine bestimmte Spektrallinie zukommt, wobei dann die Anzahl der Linien im Spektrum gleich der Anzahl der Elektronen wäre, die mit dem materiellen Atome verbunden sind. Eine mathematische Herleitung der experimentell festgestellten Grenze über die Gruppierung der Spektrallinien auf Grund solcher Hypothesen ist allerdings bisher nicht gelungen. Zur Erklärung von elektrischen Erscheinungen erfüllt diese Theorie in mancher Beziehung ihren Zweck; was die Kathodenstrahlen angeht, so steht sie mit den hier vorgetragenen Anschauungen über feste charakteristische Atomgestalten nicht in Widerspruch, denn es ist kein Grund vorhanden, weshalb ein Atom bestimmter Form unter geeigneten Umständen nicht in noch kleinere Teile zerstäubt werden sollte. Wunderbar bleibt dann nur, daß sich die Uratome immer gerade so wieder zusammenfinden, daß nach Aufhören der elektrischen Störungen das ursprüngliche Atom wieder gebildet wird. Die weitere Verfolgung dieser Bemerkungen würde zu weit in die Theorie der Elektrizität hinüberführen, als daß sie uns jetzt beschäftigen könnte. Es sollte hier nur konstatiert werden, daß die zugunsten der Elektronentheorie sprechenden Tatsachen auch mit der Hypothese bestimmt geformter Atome vereinbar sind; in der Tat, wenn man annimmt, daß im Innern der Atome elastische Schwingungen stattfinden, so ist dies verträglich mit der Vorstellung, daß die Atome sich ihrerseits aus kleineren Teilchen zusammensetzen, die ihre gegenseitige Lage bei den Schwingungen periodisch ändern.

Unsere Betrachtungen haben uns dahin geführt, das Problem der qualitativen Unterscheidung chemischer Stoffe auf ein mathematisches Problem der Gestalt und der Zahl in einer Reihe von Fällen zurückzuführen. Das einzelne Element erscheint charakterisiert durch die drei Achsenlängen des das Atom darstellenden Ellipsoids oder durch die Zahlen, welche Größe und Form eines Ringes oder Wulstes definieren. Unaufgeklärt bleibt dabei die weitere Frage, weshalb nur gewisse, ganz bestimmte Zahlengruppen in Betracht kommen, so viele Gruppen, als es verschiedene Elemente mit ellipsoidischen oder ringförmigen Atomen gibt. Weshalb kann man diese Achsenlängen und sonst bestimmenden Zahlen nicht ganz beliebig wählen und dann immer ein ihnen entsprechendes Element angeben? oder kurz, weshalb gibt es nur eine endliche Anzahl von Elementen? weshalb fehlen die Zwischenglieder? Es müssen Kräfte in der Natur vorhanden sein, die uns noch unbekannt sind und die bei Bildung der Atome bestimmend wirken, vielleicht noch heute andauernd wirken, um die Atome in ihren festen Gestalten zu erhalten oder etwa entstehende Abweichungen und Variationen sofort wieder zu vernichten. Es ist diese Frage ganz analog der andern,

weshalb nur eine endliche bestimmte Anzahl von lebenden Organismen existieren oder existenzfähig sind. Wir wissen, daß hier der Kampf ums Dasein und die Auswahl des Tüchtigsten einen hervorragenden Einfluß auf Bildung und Erhaltung der Organismen ausübten; sollten analoge Verhältnisse auch in der anorganischen Natur herrschen? sollten die existierenden Elemente eben deshalb vor etwaigen anderen Möglichkeiten ausgezeichnet sein, weil sie sich am besten den für sie geltenden äußeren Bedingungen anpassen? Das sind Fragen, die wir zur Zeit kaum in ein mathematisches Gewand einkleiden, noch viel weniger beantworten können; bis zu ihnen dürfte es gelungen sein, die Grenzlinie unserer Erkenntnis zu verschieben, um qualitative Merkmale der Materie auf quantitative Unterscheidungen zurückzuführen; wir dürfen vertrauen, daß die Zukunft unsere ferneren Zweifel lösen und klären wird.

